中国生态农业学报 2016 年 11 月 第 24 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2016, 24(11): 1473−1481

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160482

水钾耦合对花生生理性状及产量的影响*

张 鹏[1,3] 张玉龙[1] 迟道才[2] 邹洪涛[1] 高 娜[1] 曲 晶[1] 虞 娜[1**]

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院/农业部东北耕地保育重点实验室 沈阳 110866;
2. 沈阳农业大学水利学院 沈阳 110866; 3. 天水市麦积区农业技术推广中心 天水 741020)

摘 要 为明确不同水钾耦合对花生生理性状及生殖生长的影响，以'花育 25'为试验材料，采用水分[土壤含水量为 35%(水分胁迫, W_1)、50%(轻度水分胁迫, W_2)、65%(水分适中, W_3)、80%(水分过量, W_4)田间持水量]和钾肥[0 g(K_2O)·kg^{-1}(土)(缺钾, K_0)、0.15 g(K_2O)·kg^{-1}(土) (低钾, K_1)、0.30 g(K_2O)·kg^{-1}(土) (中钾, K_2)、0.45 g(K_2O)·kg^{-1}(土) (高钾, K_3)]2 因素 4 水平随机区组设计，通过遮雨棚盆栽试验探讨不同水钾耦合下花生叶片保护酶活性在结荚期后期的差异，以及生殖生长的差异，为干旱半干旱地区花生的高效水肥管理技术提供一定的理论依据。结果表明，水分对花生叶片相对含水量和叶绿素含量的影响极显著，叶片含水量对叶绿素有明显的稀释作用，随灌水量的增加叶片相对含水量(RWC)和叶绿素含量呈现出相反的变化趋势，两者为极显著负相关。水分和钾肥对超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性均存在显著或极显著的正交互效应。3 种酶对不同的逆境响应不同，SOD 活性在缺钾(K_0)或高钾(K_3)条件下升高明显，POD 酶在水分胁迫(W_1)或 K_3 时升高极显著，CAT 酶在 W_1 或 K_0 时升高显著。随土壤含水量的升高，叶片 CAT 活性迅速下降，且与叶绿素含量呈极显著正相关，说明 CAT 在花生结荚期后期可减缓叶绿素降解，延长叶片功能期。钾肥和灌水对单株开花总量的影响分别达显著和极显著水平，施钾肥能显著推迟始花时间，而减少灌水量能提前终花时间。在中钾(K_2)时各水分处理有效花量和有效花率均处于较高水平。在水分适中(W_3)时，钾肥对单粒仁重有促进作用，水分轻度胁迫(W_2)也有利于单粒仁重的增加。单株荚果数显著增加和双仁果率提高是水分效应增产的重要原因。以中水中钾 W_3K_2 处理花期最短(25 d)、有效花率最大，达 51.0%，籽仁产量最高。

关键词 花生 水钾耦合 生殖生长 抗氧化酶活性 有效花 产量
中图分类号: S565.2; S158.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)11-1473-09

The combined effect of irrigation and potassium fertilization on the physiological characteristics and yield of peanut*

ZHANG Peng[1,3], ZHANG Yulong[1], CHI Daocai[2], ZOU Hongtao[1], GAO Na[1], QU Jing[1], YU Na[1**]

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University / Key Laboratory of Northeast Farmland Conservation, Ministry of Agriculture, Shenyang 110866, China; 2. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3. Maiji Agricultural Technology Promotion Center of Tianshui City, Tianshui 741020, China)

Abstract This study clarified the combined effects of different levels of water and potassium supply on physiological characteristics and reproductive growth of peanut. To that end, a pot experiment was conducted to investigate the differences in leaf enzyme activities at late podding stage and reproductive growth. It was a random block design experiment with two factors and four levels for each factor — W_1: 35% field capacity; W_2: 50% field capacity; W_3: 65% field capacity ; W_4: 80% field capacity; K_0: 0 g(K_2O)·kg^{-1}(soil); K_1: 0.15 g(K_2O)·kg^{-1}(soil); K_2: 0.30 g(K_2O)·kg^{-1}(soil); K_3: 0.45 g(K_2O)·kg^{-1}(soil). The

* 公益性行业(农业)科研专项经费(201303125)和国家重点研发计划课题(2016YFD0300807)资助
** 通讯作者: 虞娜，主要从事土壤改良和农业节水研究。E-mail: sausoilyn@163.com
张鹏，主要研究方向为农业节水。E-mail: 1275281591@qq.com
收稿日期: 2016−05−28 接受日期: 2016−06−29

* The study was supported by the Special Funds for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201303125) and the National Key Research and Development Plan (2016YFD0300807).
** Corresponding author, E-mail: sausoilyn@163.com
Received May 28, 2016; accepted Jun. 29, 2016

tested peanut cultivar was 'Huayu 25'. The results showed that irrigation had an extremely significant ($P < 0.01$) effect on relative water content (RWC) and chlorophyll content of peanut leaves. Also leaf water had an obvious dilution effect on chlorophyll content. Thus, the RWC increased significantly ($P < 0.01$), while chlorophyll content decreased significantly ($P < 0.01$) with increasing irrigation amount. Moreover, interaction of water and potassium had an extremely positive effect on the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). The three enzymes had different responses to different adverse conditions. SOD activity increased obviously under deficient potassium (K_0) or high potassium (K_3) conditions. Also POD increased significantly ($P < 0.01$) under water stress (W_1) or K_3, while CAT increased significantly ($P < 0.05$) in W_1 or K_0 conditions. With increasing soil water content, CAT activity decreased rapidly to match with the dynamics in chlorophyll content, which two processes had an extremely significant positive correlation ($P < 0.01$). These evidences indicated that CAT was a key element in reducing the degradation of chlorophyll and lengthening the functional period of peanut leaf at late podding stage. The effects of potassium fertilizer and irrigation on total flowering were significant or extremely significant. The application of potassium fertilizer significantly delayed the beginning of flowering, but reduced irrigation amount advanced termination of florescence. Under K_2 condition, fertile flower number and flower fertility rate of all the water treatments were relatively high. Under W_3 condition, potassium fertilizer had an enhancing-effect on single seed weight, which was also occurred under W_2 condition. The significant increase in single pod number and in dual kernel fruit rate enhanced the yield-increase effect of soil moisture. For all the treatments, W_3 and K_2 had the shortest florescence (25 days), the highest rate of fertile flowers (51%) and seed kernel yield in this experiment.

Keywords Peanut; Irrigation and potassium coupling effect; Reproductive growth; Antioxidant enzymes activities; Fertile flower; Yield

我国北方地区水资源短缺严重，单位耕地面积水资源量仅为世界水平的1/2，且农业灌溉水的利用效率只有40%~50%，而发达国家可达70%~80%[1]。我国钾矿资源匮乏，且当季利用率不高，只有35%~50%，远低于发达国家[2]。花生(*Arachis hypogaea* Linn.)是我国重要的油料作物，其主要产区分布在干旱半干旱地区，水肥资源不足与其低利用率之间的矛盾严重制约了花生生产的可持续性。

正常情况下植物体内的酶促和非酶促系统会有效清除过多的活性氧，当植物遭受严重的干旱胁迫，体内活性氧的产生和清除之间的平衡就会受到破坏[3]。国外学者研究表明，小麦(*Triticum* spp.)中的*CAT1*和*CAT2*的基因表达量会随着干旱程度的不同和昼夜规律的变化而发生改变，特别是在严重干旱时表达量显著增强[4]。对作物抗逆生理的研究表明，在受到水分胁迫时，施钾肥能显著提高玉米(*Zea mays* L.)各生育期的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性，降低MDA含量；而正常供水时，钾肥的表现则不突出[5]。鲁剑巍等[6]认为，钾素营养与POD、CAT和SOD活性密切相关，甚至可作为油菜(*Brassica* spp.)钾营养诊断的辅助指标。随着研究的深入，人们开始认识到钾肥在促进作物叶绿体发育、提高光合作用、延缓衰老方面具有重要作用[7]。花生具有无限开花的习性，因外界环境条件的不同，有效花期的长短也表现各异[8]。研究表明低产花生花量大、花期长，大多花而不实，而高产花生则花量适中且集中。劳方业等[9]认为，花生单株开花总量在75~100朵，且有效花不低于总数的60%应作为选育高产花生的基本标准。在影响花生荚果产量的诸多因素中，合理的水肥调控是花生高产的关键[10]。苗期适当控水，可提高双仁果率[11]；结荚期适当控水，有利于果仁数、荚果重和饱果率的提高[12]。花生具有共生固氮的能力，所以对氮肥的需求不是很大，过量施用会导致单株饱果数、出仁率减少，而钾肥却能显著提高花生产量[13]。近些年，国内外众多学者在作物水肥耦合技术方面展开了深入研究[14]，但关于水钾耦合对花生叶片保护酶活性及生殖生长影响的研究还鲜有报道。为此，本文探讨不同水钾耦合条件下花生SOD、POD、CAT、开花物候及产量的差异，以期为我国干旱半干旱地区花生的高效水肥管理提供一定的依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2014年5—10月在沈阳农业大学试验基地遮雨棚内进行。采用盆栽方法，所用盆钵为普通塑料桶，高30 cm，直径25 cm，底部有4个通气孔。供试土壤为褐土，采自辽宁省阜蒙县老河土乡，土壤有机质含量19.21 g·kg^{-1}，全氮1.15 g·kg^{-1}，全磷0.41 g·kg^{-1}，全钾24.97 g·kg^{-1}，碱解氮69.60 mg·kg^{-1}，有效磷15.56 mg·kg^{-1}，速效钾100.07 mg·kg^{-1}，田间持水量(FC)25.25%。土壤经过自然风干、粉碎过 5 mm筛后，按照每桶15 kg的规格称取风干土，与基肥混合后装桶。灌溉用水为自来水，供试花生品种为'花育25'。

1.2　试验设计

试验采用水分、钾肥2因素4水平随机区组设计，共16个处理，每个处理3次重复(3桶)。土壤相对水分含量的4个水平分别为：水分胁迫(W_1, 35%田间持水量)、轻度胁迫(W_2, 50%田间持水量)、水分适中(W_3, 65%田间持水量)、水分过量(W_4, 80%田间持水量)。钾肥采用硫酸钾，养分含量以K_2O计，4个水平分别为：不施钾(K_0, 0 kg·hm^{-2})、低钾(K_1, 135 kg·hm^{-2})、中钾(K_2, 270 kg·hm^{-2})、高钾(K_3, 405 kg·hm^{-2})。所用氮肥为尿素，N素用量为60 kg·hm^{-2}，钾肥和氮肥分两次施入，即1/2的钾肥和氮肥做基肥施入，剩下1/2的钾肥和氮肥在结荚期作追肥施入。磷肥为过磷酸钙，P_2O_5用量为150 kg·hm^{-2}，作为基肥一次性施入。播种前3 d将各桶土壤水分调成田间持水量，可用称重法算出加水量，所加水量平均分成3份，第1份加在表层，第2份用塑料管加在10 cm深处，第3份用塑料管加在20 cm深处，这样能使肥料在土中均匀分布。水分处理前所有处理水分均控制在70%田间持水量，确保花生苗期的正常生长。在播种后的第21 d开始水分处理，用称重法确定灌水量。在花生的整个生长季，各处理水分均控制在设计水平，视气温情况，每隔1~3 d补充灌溉。试验于5月23日播种。每桶种两穴，每穴种两粒，出苗10 d后再间苗，每穴留1株。

1.3　测定项目和方法

开花、成针、结荚情况：采用定株观察法。自 6 月 23 日开第 1 朵花开始，每天下午 4:00 记载新开花数量，并记录每个观察对象第一朵花的开放时间(始花时间)，最后一朵花开放的时间(末花时间)。10 月 8 日成熟收获后，以盆为单位将所有果针剪下计数，然后考种，计算单株结荚数、双仁果率。

叶片相对含水量、叶绿素含量和酶活性：以饱和称重法测定叶片相对含水量(RWC)。8 月 27 日上午 10:30 选取长势一致的花生植株的倒三叶测定叶绿素，采用日产 SPAD-502 叶绿素计测定，以 SPAD 值代表叶绿素相对含量。随后取样并快速装入冰盒临时保存，带回实验室后置于−80 ℃冰箱备用。CAT 活性采用紫外吸收法测定，以每分钟内 A_{240} 减少 0.1 的酶量为 1 个酶活单位(U); SOD 活性采用 NBT 法测定，以抑制 NBT 光化还原 50%作为 1 个酶活单位(U); POD 活性采用愈创木酚法测定[15]，以每分钟内 A_{470} 变化 0.01 为 1 个酶活单位(U)。

1.4　数据处理及分析方法

采用Microsoft Excel 2013进行数据整理和作图，DPS 7.5数据分析软件进行统计分析。本文图表中的所有数据均是3次重复的平均值。以花生始花后15 d为有效花临界期[9]。

有效花率=单株有效花数/单株总花数　(1)

花期持续时间=末花时间(d)–始花时间(d)　(2)

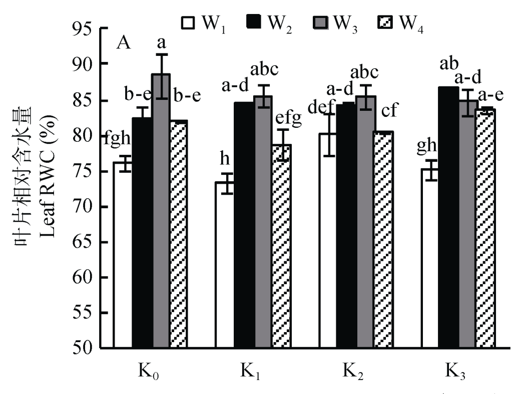
叶片相对含水量=(鲜重–烘干重)/(吸湿重–烘干重)×100%　(3)

2　结果与分析

2.1　水钾耦合效应对花生叶片相对含水量和叶绿素含量的影响

2.1.1　水钾耦合对叶片相对含水量的影响

叶片相对含水量(RWC)是反映叶片水分状况的重要指标。双因素方差分析表明，灌水量对RWC的影响达极显著水平(P<0.01)。从图1A可以看出，在相



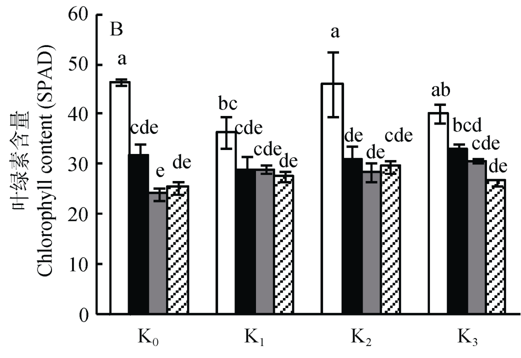


图 1　水钾耦合对花生叶片相对含水量(A)和叶绿素(B)含量的影响

Fig. 1　Coupling effects of irrigation and potassium on the leaf relative water content (RWC) (A) and SPAD (B) of peanut

图中 W 和 K 分别为灌水和施钾因子，W_1：水分胁迫；W_2：轻度胁迫；W_3：水分适中；W_4：水分过量；K_0：不施钾肥；K_1：低钾；K_2：中钾；K_3：高钾。不同小写字母表示处理(n=16)间差异显著(P<0.05)，当标示超过 4 个字母时用缩写形式，如“bcde”缩写为“b-e”，下同。

W and K mean irrigation and potassium factors, respectively. W_1, W_2, W_3 and W_4 refer to water stress, mild water stress, moderate water and excess water stress, respectively; K_0, K_1, K_2 and K_3 refer to no potassium, low potassium, mild potassium and high potassium, respectively. Different letters indicate differences among different treatments assessed by Duncan's Multiple Range test (P < 0.05). The form of abbreviations is used when the numbers of letters marking is more than 4, such as “bcde” abbreviate as “b-e”. The same below.

同施钾条件下，RWC 随水分的变化总体上呈“低–高–低”的变化趋势。除 K_3 外其他 3 个施肥条件下，RWC 最高值都出现在 W_3，其中 W_3K_0 值最大，为 88.54%，在同组不施肥条件下，极显著($P<0.01$)高于 W_1K_0、W_2K_0 和 W_4K_0，这说明土壤水分含量高于或低于 65% 田间持水量(FC)都不利于 RWC 的提高。在相同土壤水分条件下，RWC 随施钾量的增加变化不明显。

2.1.2　水钾耦合对叶片叶绿素含量的影响

在叶片的衰老过程中，叶绿素是最先降解的部分之一。由图 1B 可知，在相同施钾处理下，叶绿素含量随着水分的增加总体上呈减少的趋势。统计分析表明，K_0 和 K_2 条件下，W_1 与其他 3 个水分处理的叶绿素含量相比差异达极显著水平($P<0.01$)；在 K_1 和 K_3 条件下，W_1 与其他 3 个水分处理相比差异显著($P<0.05$)，这可能是由于植物长期处于水分充足供应状态，对叶绿素有一定的稀释作用。

2.2　水钾耦合效应对花生叶片抗氧化酶的影响

不同水钾耦合处理对花生叶片保护酶活性影响各异。经双因素方差分析，水钾互作效应对3种酶活性的影响均达显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)水平。从图2A中可以看出，SOD活性钾肥效应平均值表现为两头高中间低，说明不施钾或施高量钾都会使其增高。从图2B可见，水分和钾肥对POD的影响相反，水和钾效应平均值显示，随着水分的增多POD活性减弱，而随着钾肥的增多而增强。在水分胁迫W_1条件下，CAT活性随钾肥用量的增多而降低，在K_1时降到最低，之后受钾肥影响不大；在该水分条件下的CAT活性都比其他处理高，其中K_0、K_2和K_3 3个处理的CAT活性均极显著高于其他处理，这表明在发生水分胁迫W_1时，植物为适应逆境环境而提高CAT活性(图2C)。综上所述，在遇到水分胁迫，缺钾或高钾逆境条件时，花生叶片保护酶活性均会被刺激提升。

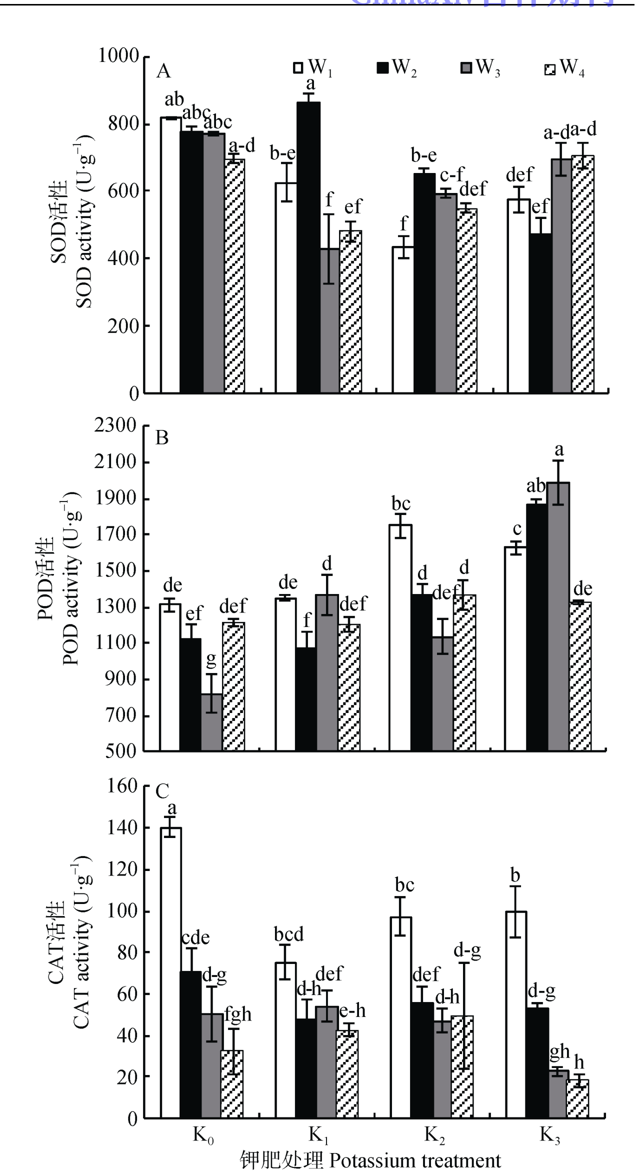


图 2　水钾耦合效应对花生叶片 SOD(A)、POD(B)和 CAT(C)活性的影响

Fig. 2　Coupling effects of irrigation and potassium on SOD (A), POD (B) and CAT (C) activities of peanut leaves

表 1　花生叶片 SOD、POD、CAT 活性和相对含水量与叶绿素含量的相关性分析

Table 1　Correlation analysis of SOD, POD, CAT activities and relative water content (RWC) with chlorophyll content

项目 Item	叶绿素含量 SPAD			
	SOD	CAT	POD	RWC
相关系数 Correlation coefficient	0.138	0.887**	0.465	−0.631**
P 值 P value	0.611	0.000	0.070	0.009

*为相关显著($P<0.05$)，**为相关极显著($P<0.01$)，下同。* means significant correlation ($P<0.05$); ** means extremely significant difference ($P<0.01$). The same below.

2.3　花生叶片抗逆酶活性、相对含水量和叶绿素含量的相关性分析

由表1可知，叶绿素含量与CAT活性呈极显著($P<0.01$)正相关，这说明可能在花生结荚期后期，CAT是叶绿体中的关键酶，能有效消除光呼吸作用产生的过氧化氢，从而减缓叶绿素的降解。从图1可知，随灌水量的增加WRC有上升的趋势，而叶绿素含量却呈下降之势，经相关性分析，两者存在极显著负相关($P<0.01$)。

2.4　水钾耦合效应对花生开花物候的影响

2.4.1　水钾耦合效应对花生开花动态的影响

经双因素方差分析，钾肥和水分效应对花生单株开花总量的影响分别达显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)水平。从图 3 可以看出，总体上各处理不同时期的花生单株开花累积量随土壤含水量的升高呈上

升的趋势; 在播种后的第 45~60 d 后, 花生开花动态曲线的斜率明显大于其他时期, 该时间段花生开花量占开花总量的 68.2%~77.5%; 由图 3C 可知, 从第 45 d 开始 W_3 处理的斜率超过了 W_4。通过对比图 3A、图 3B、图 3C 和图 3D 可以看出, 除 W_1 外各水分条件下花生单株开花总量随钾肥的增多呈“低–高–低”的变化趋势, 在 K_1 处均达最大值, 说明低钾有利于提高花生单株花的开放总量。

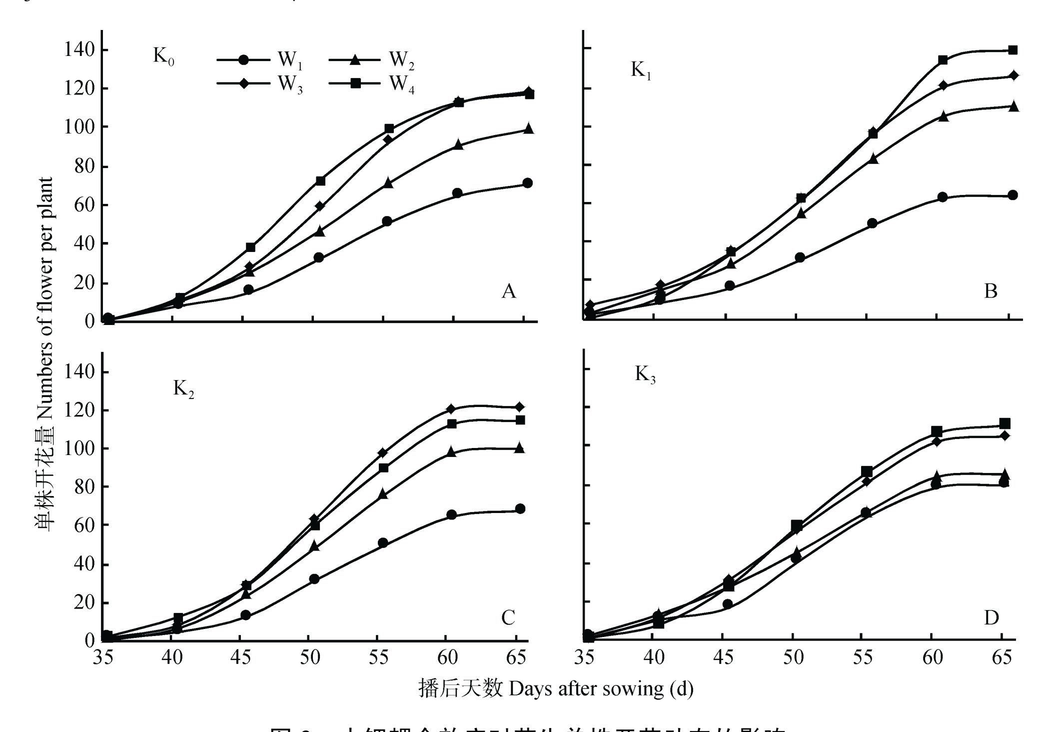


图 3　水钾耦合效应对花生单株开花动态的影响

Fig. 3　Coupling effects of irrigation and potassium on the flowering dynamics of peanut

2.4.2　水钾耦合效应对花生花期及开花量的影响

决定花期长短的是始花和末花时间, 而开花物候对水分和钾素效应的响应并不一致。钾素对始花时间有极显著(P<0.01)影响, 且水钾对其存在显著(P<0.05)的互作效应, 而水分对末花时间影响极显著(P<0.01)。在不施钾肥K_0时, 各水分处理下的花生第1朵花开放时间差异在0.7 d内; 与开花最早的K_1W_3相比, 其他处理花期延迟1.7~6 d; 在低钾K_1条件下, 各水分处理始花时间平均值早于其他各钾肥处理, 这说明不施或多施钾肥可能会延迟花期。决定末花时间的是水分, 各钾肥条件下末花时间随水分的增多有推迟的趋势, 与花期结束最早的W_1K_0相比, 其他处理花期延长1~4 d; 在W_3和W_4条件下, 末花时间随钾肥的增加呈现‘U’型变化, K_2时降到最低, 说明在水分充足时适量施钾可促使花期提前结束, W_3K_2处理的花期仅为25 d, 在所有处理中花期最短(表2)。

有效花量的变化规率和单株开花总量相对一致。施钾量不变时, 有效花量随着灌水量的增多均呈现显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)的上升趋势, 各水分处理有效花量在 K_2 时均处在较高水平, 这使得花生在花期内的不同阶段开花集中程度并不一致。所以, 单株花总量大并不代表有效花同比例的增加, 如 K_1 条件下的 W_3 和 W_4 总花量分别为 125.8 朵和 139.5 朵, 高于任何处理, 但是 K_2 条件下的 W_3 和 W_4 有效花量分别达 61.8 朵和 63.3 朵, 高于任何处理。有效花率是反映有效花期开花集中程度的重要指标, 本文中 K_2 和 K_3 处理的有效花率平均高于 K_0 和 K_1 处理。综上分析可知, 施中量钾肥不仅能保证较高的开花总量, 还能提高有效花期开花的集中度。

2.5　水钾耦合效应对果针数及产量构成的影响

水分效应和钾肥效应对果针数的影响均达极显著水平(P<0.01), 且水钾耦合效应也达显著水平(P<0.05), 相同施钾条件下, 果针数随灌水的增加而增多, 仅 K_0 下成针率有相同的变化, 其他钾肥条件下水钾对成针率影响不明显(表 3)。从表 2 和表 3 可看出, 荚果数、籽仁产量随水钾的变化规律与有效花量高度一致, 这说明有效花量是决定花生产量的关键因素。从产量构成因素分析, 各钾肥处理下水分提高产量的主要原因是单株荚果数量显著(P<0.05)增加, 另外水分显著(P<0.05)提高了双仁果率, 这也是增产的重要原因。水分对单粒仁重的影响显著(P<0.05), 不施钾

表 2 水钾耦合效应对花生花期及开花量的影响

Table 2 Coupling effects of irrigation and potassium on flowering phenology of peanut

钾肥 Potassium	水分 Water	始花时间 First flower time (DAS, d)	末花时间 End flower time (DAS, d)	花期 Florescence (d)	有效花数 Fertile flower number	有效花率 Fertile flower rate (%)
K_0	W_1	34.3±0.9abc	60.0±1.0d	25.7±0.7cd	26.0±1.2fg	36.74±1.9bc
	W_2	34.3±0.3abc	62.7±1.3abc	28.3±1.7abc	40.7±4.5c-f	41.7±6.7abc
	W_3	35.0±1.0abc	63.3±0.7abc	28.3±0.9abc	49.8±8.2a-d	41.8±5.5abc
	W_4	34.7±0.3abc	64.0±0a	29.3±0.3ab	54.8±4.3abc	46.9±3.5abc
K_1	W_1	33.0±0cd	60.0±0.6d	27.0±0.6bcd	20.5±1.0g	33.6±4.5c
	W_2	33.7±1.5bcd	61.3±0.7bcd	27.7±0.9bcd	42.8±8.0b-e	38.3±6.0bc
	W_3	31.3±0.3d	62.7±0.3abc	31.3±0.3a	41.5±4.3b-f	33.2±4.4c
	W_4	36.0±0.6abc	63.7±0.9ab	27.7±0.3bcd	58.0±4.0ab	41.5±0.6abc
K_2	W_1	34.7±1.5abc	61.3±0.3bcd	26.7±1.5bcd	26.5±3.8efg	39.4±6.0abc
	W_2	35.0±0.6abc	63.0±0.6abc	28.0±1.0bcd	40.2±6.4c-f	40.7±6.9abc
	W_3	36.7±0.9ab	61.7±0.7a-d	25.0±1.0d	61.8±6.2a	51.0±4.7ab
	W_4	33.7±0.3bcd	62.7±0.3abc	29.0±0.6ab	63.3±6.9a	56.2±7.8a
K_3	W_1	34.7±0.3abc	61.0±0cd	26.3±0.3bcd	33.2±2.8d-g	41.6±3.6abc
	W_2	34.7±0.9abc	62.0±1.2a-d	27.3±0.9bcd	41.0±5.7c-f	48.1±2.8abc
	W_3	37.3±0.9a	63.7±0.9ab	26.3±0.3bcd	50.8±1.5abc	49.8±4.7abc
	W_4	36.3±1.9ab	63.7±0.3ab	27.3±1.7bcd	44.3±3.9bcd	40.2±3.2abc
F 值	W × K	2.52*	1.14	2.59*	1.61	0.94

始花时间和末花时间指播种后时间(DAS)。表中数据为 3 次重复的平均值±标准误。W×K 表示水钾交互作用，同列数字后不同小写字母表示处理(n=16)间差异达显著水平(P<0.05)，*为差异显著(P<0.05)，**为差异极显著(P<0.01)，下同。First flower time and end flower time are days after seeding (DAS) when the first and the last flowers bloom. The date are the average ± S.E. of three measurements. W × K indicates the interactive effect between water and potassium. Different lowercase letters in the same column indicate differences assessed by Duncan's Multiple Range test (P < 0.05), * means significant difference (P < 0.05), ** means extremely significant difference (P < 0.01). The same below.

表 3 水钾耦合效应对花生果针及产量构成的影响

Table 3 Coupling effects of irrigation and potassium on floricome and yield components of peanut

钾肥 Potassium	水分 Water	花针数 Floricome number	荚果数 Podding number	双仁率 Dual-kernel fruit rate (%)	单粒仁重 Single seed weight (g)	籽仁产量 Seed yield ($g \cdot plant^{-1}$)
K_0	W_1	26.3±1.9g	10.0±1.4c	52.1±2.1a	0.70±0.06ab	9.8±0.3ef
	W_2	41.7±4.2de	15.2±0.9bc	54.2±11.0a	0.73±0.04ab	15.3±0.8cd
	W_3	63.2±5.4b	20.5±0.5ab	60.1±3.9a	0.71±0.04ab	22.3±0.7ab
	W_4	75.0±4.4a	20.0±1.3ab	55.2±4.8a	0.74±0.03ab	21.5±1.4ab
K_1	W_1	26.8±1.7g	10.2±0.7c	46.2±2.0a	0.70±0.02ab	9.5±0.4ef
	W_2	42.0±1.9de	15.3±2.9bc	51.9±3.8a	0.79±0.06a	17.1±1.8bc
	W_3	47.5±6.0cd	19.2±0.4ab	57.1±3.2a	0.72±0.10ab	19.3±2.4bc
	W_4	59.7±8.1bc	19.5±1.0ab	60.5±7.4a	0.75±0.01a	22.0±0.3ab
K_2	W_1	24.2±5.7g	10.8±1.2c	42.9±10.9a	0.68±0.09ab	8.7±0.7f
	W_2	46.8±3.3cde	13.5±0.6bc	45.4±9.2a	0.78±0.02a	14.8±1.3cde
	W_3	56.3±2.9bc	23.3±3.6a	61.5±5.4a	0.73±0.01ab	25.2±4.5a
	W_4	51.7±1.5bcd	22.5±5.5a	62.7±8.2a	0.71±0.04ab	22.2±3.3ab
K_3	W_1	28.8±0.9fg	14.8±1.6bc	40.1±2.5a	0.58±0.03b	10.2±0.6def
	W_2	34.2±3.7efg	14.5±0.9bc	47.7±5.1a	0.82±0.04a	16.6±0.8bc
	W_3	40.8±2.3def	14.8±2.5bc	42.7±10.4a	0.78±0.06a	15.6±1.3c
	W_4	55.0±0.6bc	18.5±1.5ab	62.1±1.1a	0.71±0.02ab	20.1±2.0abc
F 值 F value	W × K	2.85*	1.43	0.68	0.90	1.81

肥时 W_2 仅次于 W_4，其他钾肥条件下 W_2 都高于其他水分处理，这说明水分轻度胁迫有利于光和产物向荚果转移，在一定程度上弥补了由于荚果数减少导致的减产；在水分适中时，钾肥对单粒重也有促进作用。

3　讨论

3.1　水钾耦合对花生叶片保护酶的影响

SOD 是植物抗氧化酶系统的第一道防线，能快速将超氧阴离子自由基(O^{2-})歧化为过氧化氢(H_2O_2)和氧分子(O_2)，是有效防御细胞膜脂过氧化的主要保护性酶[16]。在水分胁迫时，耐旱紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)品种'Xinmu No.1'的 SOD 活性要比不耐旱的'Northstar'高，表明耐旱品种清除超氧自由基的能力比不耐旱品种强，这在耐干旱的菜豆(*Phaseolus vulgaris* L.)和玉米品种中也得到验证[17]。本文研究表明，在花生结荚期后期轻度水分胁迫 W_2 下，施加少量钾肥 K_1 能够刺激叶片 SOD 活性的提高，此时叶片中较高的保护酶活性能及时清理植株体内的活性氧，从而降低了对膜的伤害程度，当施钾量高于或低于 135 $kg \cdot hm^{-2}$ 时 SOD 活性都会降低。

CAT 是清除 H_2O_2 的主要酶类[18]，能将植物体内的 H_2O_2 彻底降解为水和氧分子，与 SOD 和 POD 等协同清除体内过多的活性氧[19]。高粱[*Sorghum bicolor* (L.) Moench]以 CAT 为主要抗氧化酶，在遭遇水分胁迫时 CAT 活性显著增加，这就使得高粱具有较强的抗旱能力[20]。赵丽丽等[21]对'黔金荞麦 1'荞麦(*Fagopyrum esculentum* Moench.)的研究表明，叶片 CAT 活性遭遇轻度干旱时即显著增加，且各水分梯度间差异均显著，在重度干旱条件下，CAT 活性最大，为 405.45 $U \cdot g^{-1}$。在本次试验条件下，也得到一致的结果，无论在哪种施钾处理下，水分胁迫(W_1)的 CAT 活性都要比 W_2、W_3 和 W_4 高，其中 W_1K_0、W_1K_2 和 W_1K_3 处理 CAT 活性与同组施钾条件下的其他处理相比差异都达极显著水平($P<0.01$)，说明水分胁迫(W_1)能诱发 CAT 活性的提高。

POD 除了能够代谢过氧化氢和有机过氧化物外，还参与木质素和木栓质的合成，能够修复受损的细胞壁[22]。康玉洁等[23]认为，适宜施钾量有助于提高 SOD、CAT 和 POD 活性，使细胞内活性氧代谢维持较长时间的平衡，延缓衰老，这与本文结果有相似之处。本试验表明，在水分胁迫或轻度胁迫时，适量增施钾肥有助花生叶片 POD 活性的提升。大多研究表明在水分胁迫过程中保护酶活性均呈先增后降的趋势，说明水分胁迫之初对保护系统酶活性的提升有诱导作用[23–25]。综上所述，本试验中的 3 种酶在长期水分胁迫下也都保持着较高的活性。

在机理研究中，叶片相对含水量能很好地反映出植株水分盈亏程度，一般情况叶片相对含水量和土壤含水量呈线性相关[26]。本试验条件下，叶片相对含水量随灌水量的增多先增后减，可能过多的水分影响根系的呼吸作用，反而限制了根系对水分的吸收。在植物体内叶绿素作为光合作用的物质基础，起着收集和转换光能的作用，其含量的多少在一定程度上不仅能反映光合能力的高低，还可反映叶片的衰老程度[27–28]。本试验中叶绿素含量随土壤含水量的增多呈下降的趋势，原因可能是水分胁迫或轻度胁迫下 SOD、POD 和 CAT 活性较高，能更有效地清除活性氧，从而极大程度地减缓了叶绿素降解，其中 CAT 和叶绿素含量呈极显著($P<0.01$)正相关就能很好地说明这一点。

3.2　水钾耦合对花生生殖生长的影响

高产花生在 15 d 有效花期内开花量占总开花量的 63.16%~76.36%，有效花期结束后日开花量锐减，始花后 25 d 几乎无花，开花时间比较集中[9]。本试验各处理花期都不长，在 25.0~31.3 d 内，符合高产花生的特性。郭永华等[29]研究表明，有效花数量决定着花生产量，所以花生盛花期越长对有效花和有效果针的形成越有利。本文 W_3K_2 处理的花期仅为 25 d，在所有处理中花期最短，但是其有效花率高达 51%，产量最高，这与郭永华等[29]的结果一致，可能是花期缩短有利于植株将生长中心提前转移到荚果发育上，从而节省了在无效花上的营养。前人研究认为：早开花成果多，晚开花不结果，不早不晚结批果[30]。本文研究表明，不施或多施钾肥可能会延迟始花时间，而末花时间随水分的增多有推迟的趋势，所以在花生苗期施中量钾肥可延长苗期，为始花后的集中开花做好营养储备，有效花期过后应适当控水，促使花期提前结束，这样不仅能保证较高的单株开花总量，还能提高有效花率。

花生开花都是由下到上顺序，有效花期内开花节位低，果针距离地面近，入土早，结实能力强，而高节位的果针则多为无效针，所以开花量大不一定扎针数和结果数多[30]，这与本文的研究结果一致。刘吉利等[11]认为，干旱能使花生单株结荚数显著减少，这是导致产量下降的主要原因，然而在苗期适当控水反而能促进荚果发育，从而提高了饱果率及双仁果率，也有利于百果重、百仁重和出仁率的提高，一定程度补偿了由于果数减少对产量的影响。本文研究结果与刘吉利等[11]的研究结果有相似之处，如干旱降低了荚果数量，但是单粒仁重反而高于其他处理；也有相矛盾的地方，如水分对双仁果率有显著促进作用，各钾肥条件下，双仁果率随灌水量的增多呈上升的趋势。在正常农田生产中，水分适

中时，钾肥有助于果仁的发育，能提高单粒重。

4 结论

在本试验条件下，水分胁迫或轻度水分胁迫时，SOD、CAT 和 POD 都保持较高的活性，能够在一定程度上提高花生的抗旱性。在结荚期后期，叶绿素素含量与 CAT 活性变化一致，这说明在花生结荚期后期 CAT 在叶片保护酶系统中起主导作用。花生一生的开花量很大，合理的水肥调控在一定程度上可以促使开花节奏朝着有利的方向改变，最终增加产量。所以在花生苗期施中量钾肥可延长苗期，有效花期过后应适当控水，促使花期提前结束，这样不仅能保证较高的单株开花总量，还能提高有效花率。花期结束后应该恢复灌水，以保证双果仁率。总之在整个生育期土壤水分控制在 65%田间持水量，钾肥用量为 270 kg·hm^{-2} 时，最有利于荚果数和籽仁产量的提高。

参考文献 References

[1] 夏军，刘春蓁，任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1–12
Xia J, Liu C Z, Ren G Y. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(1): 1–12

[2] 张民，杨越超，宋付朋，等. 包膜控释肥料研究与产业化开发[J]. 化肥工业, 2005, 32(2): 7–13
Zhang M, Yang Y C, Song F P, et al. Study and industrialized development of coated controlled release fertilizers[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2005, 32(2): 7–13

[3] Prasad T K. Mechanism of chilling induce doxidative stress injury and tolerances: Changes in antioxidant system, oxidation of proteins and lipidsand protease activities[J]. Plant Journal, 1996(10): 1017–1026

[4] Luna C M, Pastori G M, Driscoll S, et al. Drought controls on H_2O_2 accumulation, catalase (CAT) activity and *CAT* gene expression in wheat[J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(411): 417–423

[5] 张立新，李生秀. 氮、钾、甜菜碱对水分胁迫下夏玉米叶片膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(3): 482–490
Zhang L X, Li S X. Effects of nitrogen, potassium and glycinebetaine on the lipid peroxidation and protective enzyme activities in water-stressed summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(3): 482–490

[6] 鲁剑巍，陈防，刘冬碧，等. 钾素水平对油菜酶活性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2002, 24(1): 61–62
Lu J W, Chen F, Liu D B, et al. Effect of potash application on some enzyme content in rapeseed leaf[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2002, 24(1): 61–62

[7] 江贵波，陈实. 钾、钙、镁对作物衰老的影响[J]. 现代农业科技, 2005(21): 47–48
Jiang G B, Chen S. Effects of potassium, calcium and magnesium on the senescence of crops[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2005(21): 47–48

[8] 甄志高，段莹，王晓林，等. 豫南旱地花生开花及干物质积累规律研究[J]. 花生学报, 2007, 36(2): 16–18
Zhen Z G, Duan Y, Wang X L, et al. Studies on the blossom and dry matter accumulation rules with arid land planted peanut in south Henan area[J]. Journal of Peanut Science, 2007, 36(2): 16–18

[9] 劳方业，罗葆兴，黎杰强. 珍珠豆型花生开花量与产量关系的研究[J]. 花生科技, 1993(4): 7–9
Lao F Y, Luo B X, Li J Q. Study on the relationship between flowering and yield of Pearl bean type peanut[J]. Journal of Peanut Science, 1993(4): 7–9

[10] 鲁成凯，宋吉英，孙世玲，等. 超高产花生开花与结果规律的研究[J]. 青岛农业大学学报：自然科学版, 2008, 25(4): 258–261
Lu C K, Song J Y, Sun S L, et al. Sdudy on the habit of flowering and fruiting of super high-yielding peanut[J]. Journal of Qingdao Agricultural University: Natural Science, 2008, 25(4): 258–261

[11] 刘吉利，王铭伦，吴娜，等. 苗期水分胁迫对花生产量、品质和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科技导报, 2009, 11(2): 114–118
Liu J L, Wang M L, Wu N, et al. Effect of water stress on yield, quality and WUE during peanut seedling stage[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2009, 11(2): 114–118

[12] 曹铁华，梁烜赫，张磊，等. 开花后水分胁迫对花生产量形成过程的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2011, 33(1): 9–13
Cao T H, Liang X H, Zhang L, et al. Effects of water stress on peanut yield formation process after flowering[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2011, 33(1): 9–13

[13] 张翔，焦有，孙春河，等. 不同施肥结构对花生产量和品质的影响[J]. 土壤肥料, 2003(2): 30–32
Zhang X, Jiao Y, Sun C H, et al. Influence of different fertilization treatment on yield and quality of peanut[J]. Soils and Fertilizers, 2003(2): 30–32

[14] Sürücü A, Boydak E, Demirkıran A R, et al. The effect of irrigation and nitrogen on mineral composition of peanut (*Arachis hypogaea* L.) leaves[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2013, 11(3/4): 824–827

[15] 张治安，陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 长春：吉林大学出版社, 2008: 180–187
Zhang Z A, Chen Z Y. Experimental Instruction of Plant Physiology[M]. Changchun: Jilin University Press, 2008: 180–187

[16] Ushimaru T, Ogawa K, Ishida N, et al. Changes in organelle superoxide dismutase isoenzymes during air adaptation of submerged rice seedlings: Differential behaviour of isoenzymes in plastids and mitochondria[J]. Planta, 1995, 196(3): 606–613

[17] Wang W B, Kim Y H, Lee H S, et al. Analysis of antioxidant enzyme activity during germination of alfalfa under salt and

drought stresses[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47(7): 570–577

[18] Akcay U C, Ercan O, Kavas M, et al. Drought-induced oxidative damage and antioxidant responses in peanut (*Arachis hypogaea* L.) seedlings[J]. Plant Growth Regulation, 2010, 61(1): 21–28

[19] 魏瑞成, 裴燕, 政晓丽, 等. 金霉素和其代谢物胁迫对小白菜幼苗生长和抗氧化酶活性及累积效应的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(5): 102–110
Wei R C, Pei Y, Zheng X L, et al. Effects of chlortetracycline and 4-epi-chlortetracycline stress on seedling growth, antioxidant enzyme activities and accumulation in pakchoi[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(5): 102–110

[20] 邵艳军, 山仑, 李广敏. 干旱胁迫与复水条件下高粱、玉米苗期渗透调节及抗氧化比较研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 68–70
Shao Y J, Shan L, Li G M. Comparison of osmotic regulation and antioxidation between sorghum and maize seedlings under soil drought stress and water recovering conditions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(1): 68–70

[21] 赵丽丽, 向清华, 张文, 等. 水分胁迫对黔金荞麦 1 号生理特性的影响[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(5): 45–49
Zhao L L, Xiang Q H, Zhang W, et al. Effects of water stress on physiological characteristics of fagopyrum dibotrys CV. Qianjin No.1[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(5): 45–49

[22] 周晓慧, Wolukau J N, 李英, 等. 甜瓜蔓枯病抗性与 SOD、CAT 和 POD 活性变化的关系[J]. 中国瓜菜, 2007(2): 4–6
Zhou X H, Wolukau J N, Li Y, et al. Relationship between resistance to bacterial blight and changes of SOD, CAT and POD activity in Melon[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2007(2): 4–6

[23] 康玉洁, 王月福, 赵长星, 等. 不同施钾水平对花生衰老特性及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(4): 117–122
Kang Y J, Wang Y F, Zhao C X, et al. Effects of different potassium application on senescence and yield in peanut[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(4): 117–122

[24] 贾学静, 董立花, 丁春邦, 等. 干旱胁迫对金心吊兰叶片活性氧及其清除系统的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(5): 248–255
Jia X J, Dong L H, Ding C B, et al. Effects of drought stress on reactive oxygen species and their scavenging systems in *Chlorophytum capense* var. *medio-pictum* leaf[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(5): 248–255

[25] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1386–1396
Pei B, Zhang G C, Zhang S Y, et al. Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1386–1396

[26] 中国农业科学院. 中国农业气象学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 74–75
Chinese Academy of Agricultural Sciences. Chinese Agricultural Meteorology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 74–75

[27] 刘世鹏, 曹娟云, 刘冲, 等. 水分胁迫对绿豆幼苗渗透调节物质的影响[J]. 延安大学学报: 自然科学版, 2008, 27(1): 55–58
Liu S P, Cao J Y, Liu C, et al. The effect of water stress on adjusting osmotic substance of mung seedling[J]. Journal of Yan'an University: Natural Science Edition, 2008, 27(1): 55–58

[28] 赵莉, 潘远智, 朱峤, 等. 6-BA、GA_3和 IBA 对香水百合叶绿素含量及抗氧化物酶活性的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 248–256
Zhao L, Pan Y Z, Zhu Q, et al. Effects of 6-BA, GA_3 and IBA on photosynthetic pigment content and related enzyme activities of *Lilium casa blanca*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(5): 248–256

[29] 郭永华, 郭护团, 李君, 等. 渭北旱原花生开花规律及对结实性的影响[J]. 陕西农业科学, 2002(7): 8
Guo Y H, Guo H T, Li J, et al. Regularity of flowering and its effects on the bearing habit of peanut in the north arid plateau of Weihe River[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2002(7): 8

[30] 贾继坤, 王振玖. 花生开花结果规律的研究[J]. 中国油料, 1980(3): 56–61
Jia J K, Wang Z J. Study on the regularity of peanut fruit[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 1980(3): 56–61